

ANALISI MICROSTRUTTURALE DI GIUNZIONI FRICTION STIR WELDING IN ALLUMINIO AA6060-T6: CORRELAZIONE TRA PARAMETRI DI PROCESSO E DIMENSIONE DEI GRANI

G. D'Urso, M. Longo, C. Giardini

Il presente lavoro illustra i risultati di una campagna sperimentale finalizzata allo studio della microstruttura di giunzioni ottenute mediante tecnologia FSW – Friction Stir Welding. La campagna sperimentale è stata eseguita su piatti di alluminio AA6060-T6 di spessore 8 mm saldati di testa. Le saldature sono state ottenute variando i parametri di processo, vale a dire la velocità di rotazione (S [giri/min]) e la velocità di avanzamento (f [mm/min]) dell'utensile. L'esame metallografico è stato effettuato con lo scopo di esaminare la microstruttura della sezione trasversale dei giunti in funzione dei parametri di processo e di valutare la dimensione dei grani nelle varie regioni della zona di saldatura: Nugget, ZTA – Zona Termicamente Alterata, ZTMA – Zona Termo-Meccanicamente Alterata. Il conteggio dei grani è stato effettuato secondo la norma ASTM E112-96(2004). Il rapporto f/S tra velocità di avanzamento e velocità di rotazione è risultato essere un parametro particolarmente significativo per la variazione della microstruttura delle giunzioni esaminate. Il Nugget ha messo in luce una microstruttura a grani molto fini aventi una dimensione media pari a circa un terzo di quella dei grani del materiale base. La dimensione dei grani in questa zona decresce linearmente all'aumentare del rapporto f/S . La ZTMA è risultata costituita da grani fortemente allungati ed orientati diversamente rispetto a quelli delle zone circostanti. Anche in questo caso è stato possibile osservare una relazione pressoché lineare tra dimensione dei grani e rapporto f/S . La ZTA ha invece evidenziato una dimensione dei grani che decresce all'aumentare del rapporto f/S . La qualità delle giunzioni, in termini di resistenza a trazione, è stata infine correlata con le caratteristiche metallurgiche rilevate nella zona di saldatura.

Parole chiave: Alluminio e leghe – Deformazioni plastiche – Saldatura – Metallografia – Prove meccaniche – Processi – Tecnologie

INTRODUZIONE

La Friction Stir Welding (FSW) è una tecnologia di saldatura sviluppata e brevettata nel 1990 presso il The Welding Institute (TWI) di Cambridge^[1]. Tale tecnologia consente la giunzione allo stato solido di numerose leghe metalliche, comprese quelle difficilmente saldabili con tecnologie più tradizionali. Il processo prevede l'inserimento di un utensile rotante tra due elementi da saldare. Ad esso è impresso un moto traslatorio lungo la linea di giunzione e uno rotatorio intorno al proprio asse. Il materiale, riscaldato per effetto dell'attrito e della deformazione, viene "estruso" intorno

all'utensile e "forgiato" per effetto dell'elevata pressione prodotta dalla spalla dell'utensile stesso. Numerosi studi hanno messo in evidenza che i giunti saldati mediante FSW mostrano eccellenti caratteristiche di resistenza a fatica, trazione e piegatura, proprietà che in alcuni casi si presentano migliori anche rispetto a giunti ottenuti con altri processi di saldatura convenzionali^[2]. Inoltre, se paragonata alle tecniche tradizionali, la saldatura FSW viene ottenuta grazie alla deformazione del materiale a temperature inferiori a quella di fusione: questo riduce i problemi di distorsione del pezzo e sforzi residui. Per tutte le ragioni sopra esposte, questa tecnica ha potenzialmente un numero di applicazioni significativo nell'industria automobilistica, aerospaziale e navale^[3,4]. In ogni caso, la tecnologia FSW richiede una comprensione meticolosa del processo e delle proprietà meccaniche della saldatura al fine di essere utilizzata nella realizzazione di componenti ad alte prestazioni. Negli ultimi anni sono stati eseguiti diversi studi per valutare gli effetti della velocità di rotazione e dell'avanzamento, della geometria e dell'inclinazione dell'asse dell'utensile sulla qualità della giunzione (in

G. D'Urso, M. Longo, C. Giardini

Università di Bergamo – Dip. di Ingegneria
Via Pasubio, 7b, Dalmine (BG)

e-mail: durso@unibg.it, michela.longo@unibg.it,
claudio.giardini@unibg.it

termini di limite di resistenza a trazione, microstruttura del giunto, durezza, resistenza a fatica, etc.)^[5-8].

Durante la saldatura FSW, il materiale subisce un'intensa deformazione plastica ad elevate temperature, che inducono la generazione di grani ricristallizzati con una struttura differente^[4-7] e a un incremento di temperatura attorno e all'interno della zona di mescolamento. Dall'analisi microstrutturale del materiale saldato si possono individuare quattro distinte zone in prossimità di una giunzione: materiale base (MB), si tratta della parte lontana dalla zona di saldatura. In questa zona il materiale può subire un debole ciclo termico legato alla conduzione del calore che proviene dal centro del giunto, senza però mostrare alterazioni della microstruttura o delle proprietà meccaniche; zona termicamente alterata (ZTA), è la parte più esterna della giunzione, nella quale il ciclo termico di saldatura ha causato l'alterazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche del materiale; zona termo-meccanicamente alterata (ZTMA), è la zona in cui il materiale ha subito sia deformazione plastica che riscaldamento, con conseguente ricristallizzazione. Infine, la zona centrale (Nugget), caratterizzata da una microstruttura molto fine e uniforme, con caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle delle altre zone del giunto. Il contributo di un'intensa deformazione plastica e di un'esposizione ad alta temperatura all'interno della zona di mescolamento durante la FSW hanno come risultato la ricristallizzazione^[7,10,16], la dissoluzione e la distribuzione dei precipitati attorno e nella zona di mescolamento^[10-13]. Tuttavia, molti ricercatori riportano che i piccoli grani ricristallizzati della zona di Nugget contengono alta densità di bordi di grano^[9], sub-grani^[15] e dislocazioni^[16]. La struttura prodotta attraverso la FSW gode pertanto di buone proprietà meccaniche che possono essere correlate con la dimensione dei grani, la forma del bordo dei grani, la dissoluzione e la distribuzione dei precipitati.

Il presente articolo illustra i risultati di una campagna sperimentale finalizzata allo studio della microstruttura di saldature di testa eseguite mediante tecnologia FSW. La campagna sperimentale è stata eseguita su piatti di alluminio AA6060-T6 di spessore 8 mm. La dimensione dei grani nelle diverse zone della saldatura è stata rilevata e analizzata in funzione dei parametri di processo, in particolare la velocità di rotazione (S [giri/min]), la velocità di avanzamento (f [mm/min]) e il loro rapporto (f/S [mm/giro]). La qualità delle giunzioni, in termini di resistenza a trazione, è stata infine confrontata con le caratteristiche metallurgiche rilevate nella zona di saldatura.

CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna sperimentale è stata eseguita per mezzo di una macchina utensile CNC. Le saldature di testa, oggetto del presente studio, sono state eseguite su lamiera di alluminio AA6060-T6 di spessore 8 mm, utilizzando un utensile in acciaio AISI 1040 (normalizzato a 900 °C e raffreddato in aria - 168 HB) con spalla piatta e liscia e

con pin cilindrico i cui diametri sono rispettivamente pari a 20 e 8 mm. Le saldature sono state ottenute variando i parametri di processo, vale a dire la velocità di rotazione (S [giri/min]) e la velocità di avanzamento (f [mm/min]) dell'utensile. La scelta dei parametri è stata eseguita mediante un piano DOE (Design of Experiments). Tutte le condizioni di saldatura sono riassunte nella tabella 1; inoltre è stato calcolato anche il rapporto di avanzamento al giro f/S [mm/giri], i cui valori sono riportati nel piano DOE (Figura 1).

S [giri/min]	f [mm/min]	f/S [mm/giri]
838	400	0.48
900	200	0.22
900	600	0.67
1050	117	0.11
1050	400	0.38
1050	683	0.65
1200	200	0.17
1200	600	0.50
1262	400	0.32

Tabella 1: Piano degli esperimenti.

Table 1: Experimental plan.

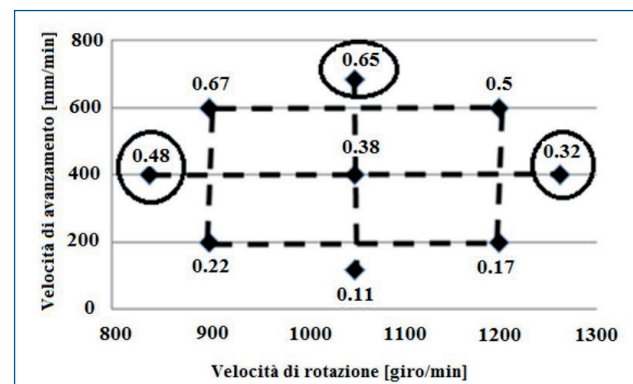


Fig. 1 - Piano DOE.

Fig. 1 - Design of Experiments (DOE).

In tutti i casi è stata assunta un'inclinazione dell'asse dell'utensile pari a 2.5°. Tutte le condizioni di processo testate hanno dato luogo a saldature quasi sempre regolari. Solo in alcuni casi, attraverso il sezionamento della giunzione, è stato possibile evidenziare la presenza di tunnel o altri difetti. In particolare, tali fenomeni hanno avuto luogo utilizzando le combinazioni di parametri di processo più estreme del piano DOE (identificate in Figura 1 con un cerchio). La Figura 2a mostra i dettagli del set-up sperimentale; la Figura 2b mostra un dettaglio del principio di funzionamento.

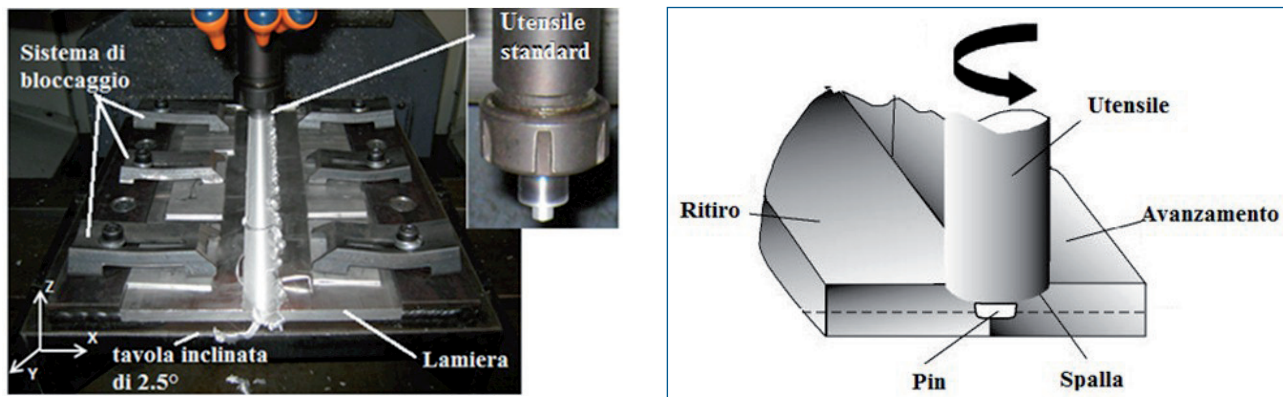


Fig. 2 - (a) Set-up sperimentale e (b) dettagli del principio di funzionamento.

Fig. 2 - (a) Experimental Set-up and (b) details of the welding process.

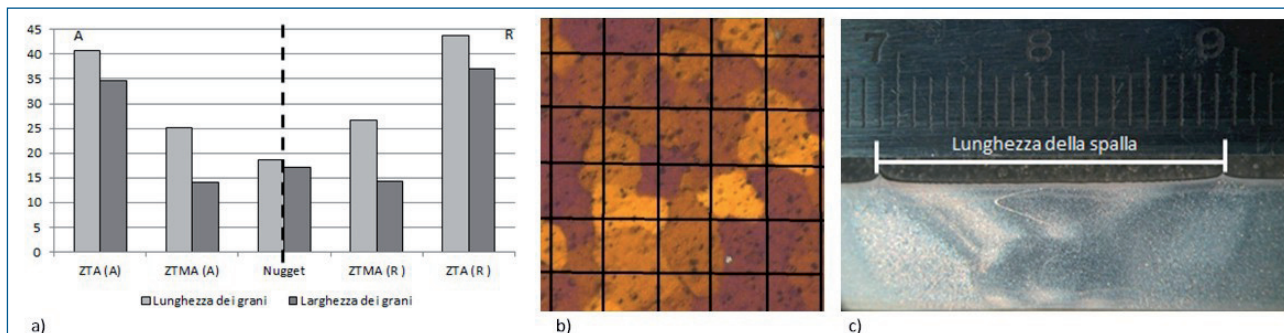


Fig. 3 - (a) Dimensioni dei grani per la condizione con S1050 e f 400, (b) microstruttura e (c) macrostruttura di una sezione trasversale di un giunto FSW.

Fig. 3 - (a) Size of grains for the condition with S1040 and f400, (b) microstructure and (c) macrostructure of the transversal section of the FSW joint.

ANALISI MICROSTRUTTURALE

È stato eseguito un esame metallografico con lo scopo di analizzare la microstruttura della sezione trasversale dei giunti in funzione dei parametri di processo e di valutare la dimensione dei grani nelle varie regioni della zona di saldatura: Nugget, ZTA, ZTMA. Per le zone termicamente e termo-meccanicamente alterate sono state considerate sia la parte di avanzamento che di ritiro. È stato condotto un attacco elettrolitico nelle seguenti condizioni: reagente Barker, tensione = 20V DC, corrente = 0,2 A/cm², tempo di permanenza = 6 min. Il conteggio dei grani è stato effettuato secondo la norma ASTM E112-96(2004) ed è stato applicato a tutti i campioni; le dimensioni dei grani sono state valutate in tutte le regioni rappresentative del giunto. È stata valutata anche la dimensione dei grani del materiale base in cui la larghezza e la lunghezza media sono rispettivamente pari a 48 e 54 µm. In Figura 3b viene riportata una micrografia utile ad illustrare la modalità di misurazione dei grani. La struttura macrografica del materiale base impiegato nella campagna è mostrata in Figura 3c.

Il materiale ha una struttura metallurgica che varia lungo lo spessore, infatti è presente una maggiore concentrazione di grani nella zona centrale che diventano più grandi e con

forma più frastagliata man mano che ci si sposta verso il bordo. Questa disomogeneità è legata al processo di laminazione con il quale è stata ottenuta la lamiera oggetto di questa indagine.

La microscopia ottica è stata utilizzata per caratterizzare le strutture metallurgiche nelle diverse regioni delle piastre saldate. La Figura 3 mostra la tipica distribuzione della dimensione dei grani nelle differenti zone del giunto. Tale dimensione decresce man mano che ci si avvicina alla zona centrale (Nugget) con una lieve ma sistematica differenza tra la zona di avanzamento e di ritiro. In particolare, la dimensione dei grani risulta essere sempre leggermente maggiore nella zona di ritiro rispetto alla corrispondente zona di avanzamento.

In Figura 4 si riportano due esempi di strutture metallurgiche derivanti da saldature FSW ottenute con differenti parametri di processo. In particolare, la Figura 4a mostra una giunzione priva di difetti ottenuta con una velocità di rotazione pari a 1050 giri/min e velocità di avanzamento pari a 683 mm/min. La Figura 4b mostra un campione ottenuto con velocità di rotazione pari a 1200 giri/min e con velocità di avanzamento pari a 200 mm/min; tale giunto presenta un difetto e la dimensione dei grani risulta essere differente dalla condizione mostrata in Figura 4a. La

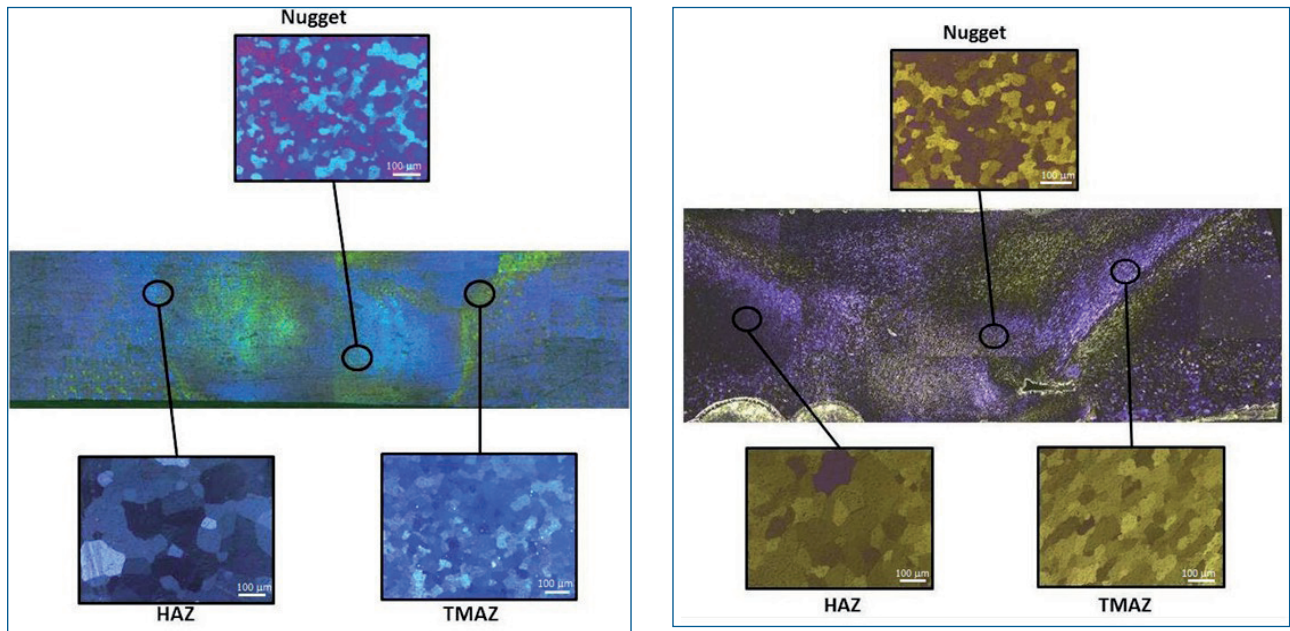


Fig. 4 - Dimensione dei grani nelle varie regioni del giunto nelle condizioni (a) S1200 giri/min e f200 mm/min e (b) S1050 giri/min e f683 mm/min.

Fig. 4 - Different size of grains in the welded zone, respectively for the conditions (a) S1200 rev/min e f200 mm/min e (b) S1050 rev/min e f683 mm/min.

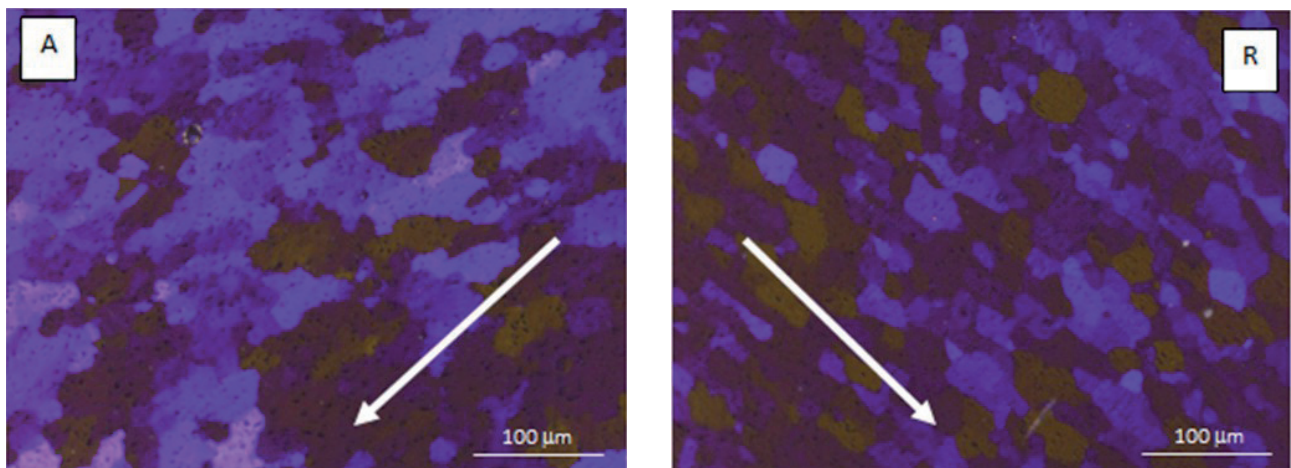


Fig. 5 - ZTMA per la condizione S1200 giro/min f600 mm/min, dettaglio della morfologia e dell'orientamento dei grani per la zona di ritiro (a) e di avanzamento (b).

Fig. 5 - TMAZ for the condition S 1200 giro/min and f 600 mm/min, details of the morfologia and orientation of the grains for the retreating side (a) and advancing side (b).

dimensione dei grani nelle zone di Nugget e ZTMA (avanzamento e ritiro), risulta essere maggiore per la condizione S1200 giri/min e f200 mm/min; un'inversione si ha invece per la ZTA (andata e ritorno) dove la dimensione dei grani risulta essere maggiore per la condizione con S1050 giri/min e f683 mm/min.

Un altro aspetto interessante che è possibile rilevare nella zona termo-meccanicamente alterata riguarda la presenza di grani allungati e orientati diversamente rispetto a quelli delle circostanti zone, con una direzione dei grani differente

tra la zona di avanzamento e di ritiro (Figura 5). Questo effetto può essere attribuito al diverso stato di sollecitazione a cui il materiale è sottoposto nelle due distinte regioni.

RELAZIONE TRA PARAMETRI DI PROCESSO E DIMENSIONE DEI GRANI

I risultati complessivi dell'analisi metallografica dei giunti, in termini di larghezza e lunghezza dei grani, sono ripor-

S [giri/min]	F [mm/min]	f/S [mm/giri]	ZTA (R)	std. dev. ZTA (R)	ZTA (A)	std. dev. ZTA (A)	ZTMA (R)	std. dev. ZTMA (R)	ZTMA (A)	std. dev. ZTMA (A)	Nugget	std. dev. Nugget
838	400	0.48	35	1.18	33	0.63	15	0.20	14	0.39	14	1.06
900	200	0.22	36	0.82	32	0.98	17	0.51	17	1.92	21	1.41
900	600	0.67	31	2.59	28	2.40	15	0.20	14	1.26	12	1.77
1050	117	0.11	48	3.42	44	3.26	17	0.51	17	2.28	22	1.77
1050	400	0.38	37	0.47	35	0.08	14	0.55	14	0.51	17	0.00
1050	683	0.65	35	1.18	31	1.34	14	0.55	14	0.90	13	1.41
1200	200	0.17	47	3.06	43	2.91	17	0.51	16	2.28	22	1.77
1200	600	0.5	31	2.59	28	2.40	16	0.16	15	0.16	16	0.35
1262	400	0.32	45	2.36	39	1.49	15	0.20	15	0.16	16	0.35

Tab. 2 - Larghezza dei grani [μm] in funzione dei parametri di saldatura.

Table 2 - Width of the grains [μm] as a function of the process parameters

S [giri/min]	f [mm/min]	f/S [mm/giri]	ZTA (R)	std. dev. ZTA (R)	ZTA (A)	std. dev. ZTA (A)	ZTMA (R)	std. dev. ZTMA (R)	ZTMA (A)	std. dev. ZTMA (A)	Nugget	std. dev. Nugget
838	400	0.48	39	1.41	33	2.08	22	1.49	22	0.68	17	0.67
900	200	0.22	48	1.77	44	1.81	28	0.63	26	0.74	21	0.75
900	600	0.67	36	2.47	30	3.14	23	1.14	20	1.38	16	1.02
1050	117	0.11	52	3.18	50	3.93	32	2.04	28	1.45	22	1.10
1050	400	0.38	44	0.35	41	0.75	27	0.27	25	0.38	19	0.04
1050	683	0.65	38	1.77	36	1.02	23	1.14	19	1.74	16	1.02
1200	200	0.17	52	3.18	44	1.81	29	0.98	27	1.09	21	0.75
1200	600	0.5	38	1.77	34	1.73	24	0.79	22.2	0.60	17	0.67

Tab. 3 - Lunghezza dei grani [μm] in funzione dei parametri di saldatura.

Table 3 - Length of the grains [μm] as a function of the process parameters.

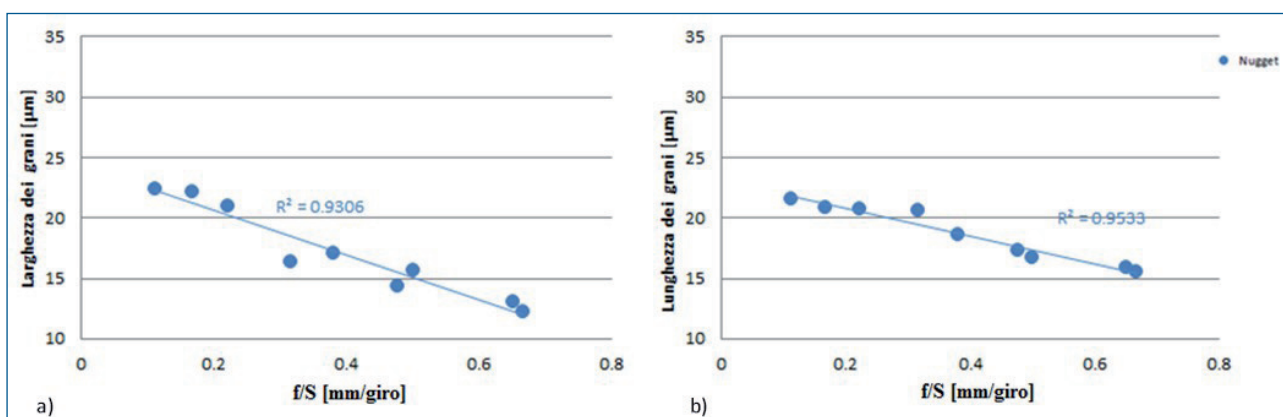


Fig. 6 - Larghezza (a) e lunghezza (b) media dei grani nella zona centrale (Nugget) in funzione del rapporto f/S.

Fig. 6 - Average width (a) and length (b) of the grains in the NUGGET zone as a function of the f/S ratio.

tati in tabella 2 e 3, con i relativi parametri di saldatura. Il rapporto f/S è risultato essere un parametro particolarmente significativo per la variazione della microstruttura delle giunzioni esaminate. Per tale ragione la dimensione dei grani delle diverse zone è stata valutata in funzione di

questo parametro. La ragione è da ricercarsi nel fatto che l'avanzamento al giro è un parametro correlabile al contributo termomeccanico fornito al giunto per effetto del rimescolamento del materiale e dell'attrito.

La Figura 6 mostra la larghezza (a) e la lunghezza (b) me-

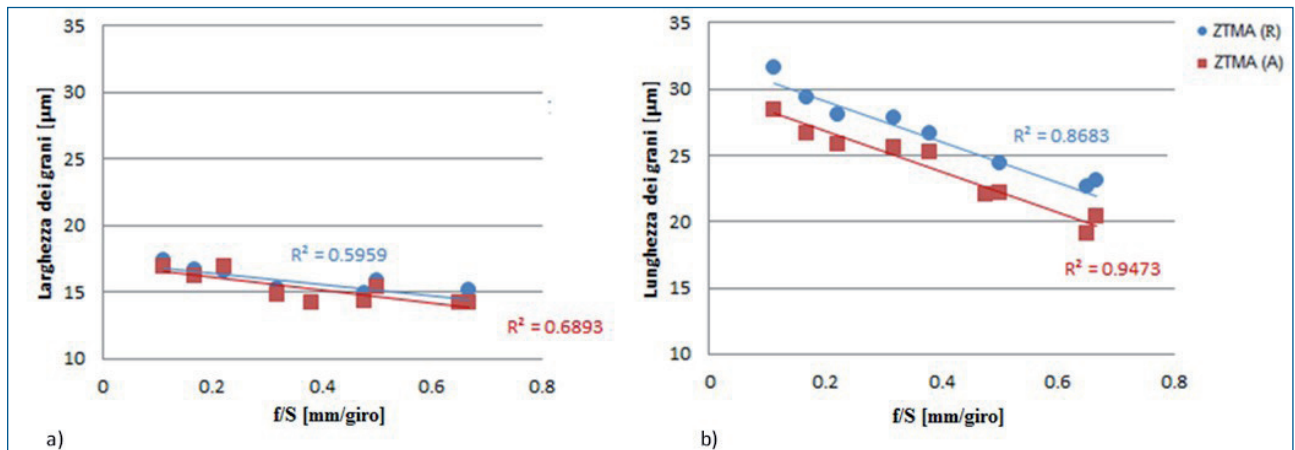


Fig. 7 - Larghezza (a) e lunghezza (b) media dei grani nella zona termo-meccanicamente alterata in funzione del rapporto f/S.

Fig. 7 - Average width (a) and length (b) of the grains in the zone TMAZ as a function of the f/S ratio.

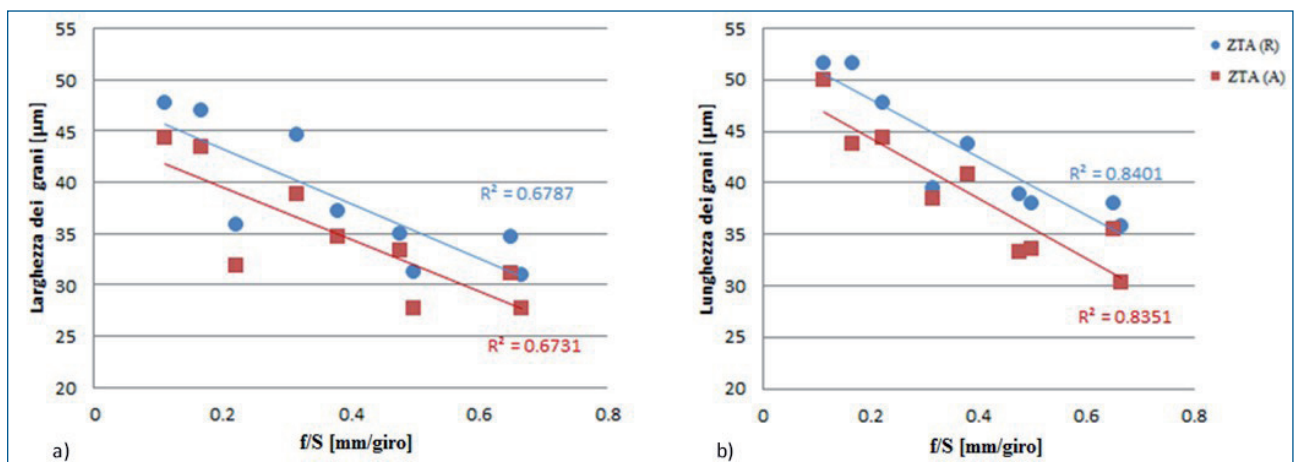


Fig. 8 - Dimensione media dei grani (a) larghezza e (b) lunghezza nella ZTA di avanzamento e di ritiro in funzione del rapporto f/S.

Fig. 8 - Average width (a) and length (b) of the grains in the HAZ zone as a function of f/S ratio.

dia dei grani in funzione del parametro f/S nella zona di ricristallizzazione dinamica (zona centrale - Nugget), con le relative rette interpolanti e i coefficienti di regressione.

Il Nugget mostra una microstruttura a grani molto fini aventi una dimensione media pari a circa un terzo di quella dei grani del materiale base. Tale ricristallizzazione è dovuta all'azione meccanica effettuata dal pin: l'utensile, con la sua azione di rimescolamento, distrugge la microstruttura originale generando nuovi grani significativamente più fini. La dimensione dei grani in questa zona decresce linearmente all'aumentare del rapporto f/S.

La Figura 7 mostra la larghezza (a) e la lunghezza (b) media dei grani nella zona termomeccanicamente alterata (ZTMA) sia per la parte di avanzamento che di ritiro. Anche in questi casi sono presenti le rette interpolanti e i relativi coefficienti di regressione. La ZTMA risulta costituita da grani fortemente allungati ed orientati diversamente rispetto a quelli delle

zone circostanti. Questo fatto è dovuto alla duplice azione dell'utensile che ha alterato il materiale sia meccanicamente che termicamente. Anche in questo caso è possibile osservare una relazione pressoché lineare tra dimensione dei grani e rapporto f/S. Inoltre la dimensione dei grani sul lato di ritiro è sistematicamente maggiore.

La Figura 8 mostra la larghezza (a) e la lunghezza (b) media dei grani nella zona termicamente alterata (ZTA) sia per la parte di avanzamento che di ritiro.

Come nella ZTMA, la dimensione dei grani diminuisce al crescere del rapporto f/S. Questo fenomeno è da attribuirsi principalmente all'assenza di contributo meccanico dell'utensile. Inoltre, è confermata una dimensione maggiore dei grani sul lato di ritiro, sebbene i dati siano più dispersi rispetto alla zona termo-meccanicamente alterata. Al fine di valutare le caratteristiche meccaniche delle saldature ottenute, i giunti sono stati sottoposti a prova di

trazione (norma UNI EN 10002-1:2004), utilizzando una macchina universale Galdabini. I provini, con larghezza pari a 18 mm e spessore 8 mm sono stati sollecitati ortogonalmente alla direzione di saldatura (Figura 9).

La superficie dei provini è stata mantenuta nelle condizioni derivanti dal processo di saldatura e sono state eseguite 3 ripetizioni della prova per ciascuna combinazione dei parametri di processo. La Figura 10a mostra la resistenza a trazione (UTS) in funzione del rapporto f/S. Ogni marker rappresenta la media di 3 prove e la linea continua rappresenta l'andamento della funzione esponenziale di fitting. I marker caratterizzati con un cerchio vuoto rappresentano le condizioni di saldatura con presenza di difetti e sono stati inseriti nel grafico per completezza, sebbene non siano stati considerati nel fitting. È possibile osservare un andamento crescente dell'UTS al crescere del parametro f/S. La Figura 10b mostra la deformazione percentuale a rottura in funzione del rapporto f/S; in questo caso si ha

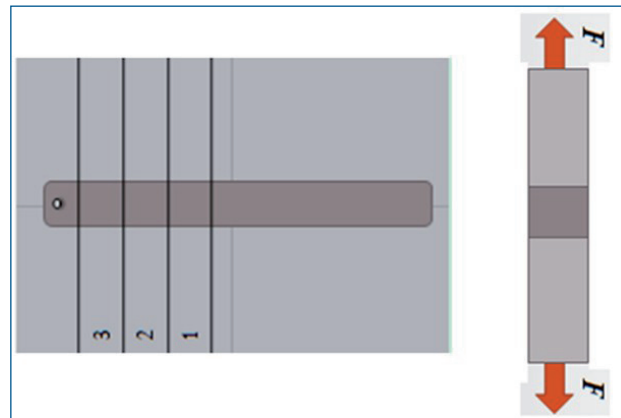


Fig. 9 - Modalità di estrazione dei provini per la prova di trazione e modalità di sollecitazione.

Fig. 9 - Tensile test specimens, cutting scheme and load direction.

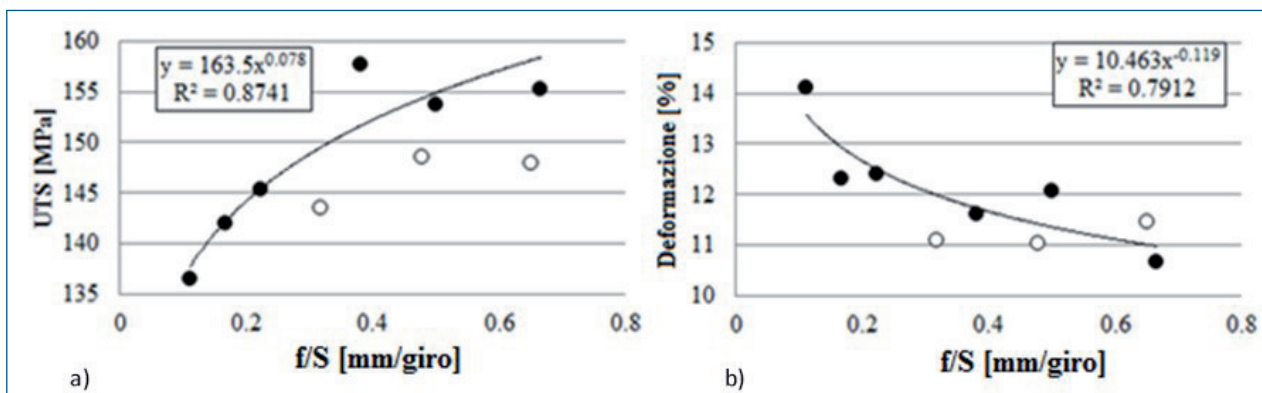


Fig. 10 - Resistenza a trazione (a) e deformazione a rottura (b) in funzione del rapporto f/S [mm/giro].

Fig. 10 - Tensile strength (a) and (b) strain at rupture as a function of the f/S ratio [mm/rev].

un'inversione dell'andamento. È importante sottolineare come, a meno dei provini con difetto, la rottura sia avvenuta sempre in corrispondenza della zona termicamente alterata, confermando quindi questa regione come la più debole dell'intera saldatura. Questo permette infine di correlare le caratteristiche metallurgiche di tale zona con la resistenza meccanica delle saldature. Secondo questa correlazione la resistenza a trazione cresce al diminuire della dimensione media dei grani, mentre per la deformabilità si ha un andamento inverso.

La scelta dei parametri di processo ottimali può essere pertanto effettuata sulla base di queste ultime considerazioni.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state analizzate delle saldature eseguite su alluminio AA6060 T6 mediante tecnologia Friction Stir Welding. Le giunzioni sono state caratterizzate mediante microscopia ottica ed è stato rilevato un forte effetto

di ricristallizzazione della struttura come conseguenza del processo studiato e dei parametri di processo applicati.

L'intensa deformazione plastica e le alte temperature raggiunte durante il processo di saldatura, comportano un'evoluzione micro strutturale del materiale nella zona di giunzione, per cui si verificano nel materiale fenomeni di ricristallizzazione e lo sviluppo di una nuova microstruttura. Le osservazioni della sezione trasversale dei giunti hanno rilevato la presenza della classica struttura "a cipolla" caratterizzata da grani molto fini nella zona centrale che tendono a crescere nelle zone più esterne, fino a trovare il loro massimo in corrispondenza del materiale base.

La dimensione dei grani ricristallizzati nelle giunzioni esaminate risulta essere dipendente dai parametri di processo, in particolare dal rapporto tra la velocità di rotazione dell'utensile e la velocità di traslazione. Infine, la dimensione dei grani nella zona più debole della giunzione (ZTA) ha delle ricadute sulla resistenza meccanica della saldatura che aumenta al diminuire del rapporto f/S.

I risultati ottenuti nel presente lavoro hanno permesso di correlare i parametri di processo con le caratteristiche

metallurgiche delle varie zone del giunto e più in generale con la resistenza meccanica delle saldature, fornendo quindi indicazioni per la selezione delle condizioni di processo ottimali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B.
- [2] C. Dawes, W. Thomas, TWI Bulletin 6, November/December 1995, p. 124.
- [3] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron, in: Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27–28 September, 2001.
- [4] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Scripta Mater. 36 (1997) 69.
- [5] G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, Scripta Mater. 37 (1997) 355.
- [6] K.V. Jata, S.L. Semiatin, Scripta Mater. 43 (2000) 743.
- [7] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, Scripta Mater. 41 (1999) 809.
- [8] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, Mater. Res. Innovat. 2 (1998) 150.
- [9] Y. Li, E.A. Trillo, L.E. Murr, J. Mater. Sci. Lett. 19 (2000) 1047.
- [13] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Acta Mater. 50 (2002) 4419.
- [14] M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, Metall. Mater. Trans. A 29 (1998) 1955
- [17] W. Tang, X. Guo, J.C. McClure, L.E. Murr, J. Mater. Process. Manufact. Sci. 7 (1998) 163.
- [18] Y.J. Kwon, N. Saito, I. Shigematsu, J. Mater. Sci. Lett. 21 (2002) 1473.
- [19] J.A. Wert, Scripta Metall. 15 (1981) 445.
- [24] B. Heinz, B. Skrotzki, Metall. Mater. Trans. B 33 (6) (2002) 489.
- [26] Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, Scripta Mater. 49 (2003) 785.

Microstructural analysis of AA6060-T6 friction stir welded joints: correlation between process parameters grain size

Keywords: FSW – Friction Stir Welding, Aluminium alloy AA6060-T6, grain size, process parameters.

The present paper reports the results of an experimental campaign aimed at the study of the microstructure of Friction Stir Welded butt joints. In this solid-state welding technology, a rotating tool moves into the material and translates along the interface of two or more parts. During this process friction heats the material which is extruded around the tool and forged by the large pressure produced by the tool shoulder. The experimental campaign was performed by means of a CNC machine tool. Butt joints were obtained on sheets having a thickness equal to 8 mm. An AA6060 aluminum alloy in the T6 artificially aged condition was used for this purpose. Sheets were welded by using a standard tool with smooth plane shoulder and cylindrical pin. The tool was fabricated using AISI 1040 steel, shoulder and pin diameters are respectively equal to 20 and 8 mm. The tilt angle, was fixed at 2.5° and the pin was inserted into the workpiece for 7.8 mm. The joints were executed by varying the process parameters, namely rotational speed (S [rev/min]) and feed rate (f [mm/min]). The selection of the parameter values was based on a DOE (Design of Experiments) approach. The metallurgical analysis was carried out to evaluate the microstructure of the joints transverse section as a function of the process parameters and to evaluate the grain size in the different regions of the joints: Nugget, HAZ – Heat Affected Zone, TMAZ – Thermo Mechanical Affected Zone. The grain count was executed according to the standard ASTM E112-96(2004). The ratio between feed rate and rotational speed resulted to be a significant parameter for the control of the joints grain size. The Nugget showed a microstructure with very small grains with an average dimension equal to one third with respect to the grains of the base material. The grain size linearly decreases for increasing values of the f/S ratio. The TMAZ is characterized by strongly elongated grains, oriented in a different way with respect to the ones of the other regions. Also in this case, an almost linear correlation between grain size and f/S ratio was observed. On the opposite, in the HAZ, the grain size decreases for increasing values of the f/S ratio. A tensile test campaign was also carried out to evaluate the mechanical properties of the joints. Specimens having a width and a thickness equal respectively to 18 mm and 8 mm were tested orthogonally with respect to the welding direction by means of a Galdabini machine. Except for the joints containing defects, the rupture always occurred in the HAZ. The increase of UTS was observed for increasing values of the ratio between feed rate and rotational speed (f/S). An inverse behaviour was observed for the strain at rupture. Finally, the quality of the joins, in terms of tensile strength, was compared with the metallurgical properties observed on the joints. The tensile strength resulted to increase for decreasing values of the grain size.